

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ШИМКОВИЧ ВОЛОДИМИР МИКОЛАЙОВИЧ**

УДК 004.896

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ПРОЕКТУВАННЯ**  
**АПАРАТНИХ КОМПОНЕНТІВ**  
**НЕЙРОМЕРЕЖЕВИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

**АВТОРЕФЕРАТ**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі автоматики та управління в технічних системах Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України.

**Науковий керівник:** кандидат технічних наук, старший науковий співробітник  
**Кравець Петро Іванович**,  
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
доцент кафедри автоматики та управління в технічних системах.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Опанасенко Володимир Миколайович**  
Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України,  
провідний науковий співробітник

кандидат технічних наук, доцент  
**Савченко Аліна Станіславівна**  
Національний авіаційний університет,  
завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних технологій

Захист відбудеться «\_\_» квітня 2021 р. о 16-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.02 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (м. Київ, пр. Перемоги, 37, корп. 18, ауд. 516).

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: м. Київ, пр. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «\_\_» березня 2021 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук, доцент



М.М. Орлова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Нейромережеві системи керування (НСК) є високотехнологічним напрямком теорії керування та відносяться до класу нелінійних динамічних систем. Висока швидкодія за рахунок розпаралелювання вхідної інформації в поєднанні зі здатністю до навчання штучних нейронних мереж (ШНМ) робить цю технологію вельми привабливою для створення пристроїв керування в автоматичних системах. ШНМ можуть бути використані для побудови регулюючих та коректуючих пристроїв, еталонних, адаптивних, номінальних та інверсно-динамічних моделей об'єктів, на основі яких здійснюється дослідження об'єктів, аналіз впливу збурень, що діють на об'єкт, визначення оптимального закону керування, пошук або обчислення оптимальної програми зміни керуючого впливу при зміні значень параметрів об'єкту та характеристик вхідних даних. ШНМ можуть бути використані в таких об'єктах як робототехніка, керування безпілотними літальними апаратами, керуванні транспортними засобами, розпізнаванні образів, аналізі та прийнятті рішень в системах Інтернету Речей, керуванні космічними кораблями, військовою технікою та багатьма іншими різними сферами застосування в сучасних технологіях. У цих системах нейронні мережі можуть використовуватися для ідентифікації об'єктів, прогнозування стану об'єктів, розпізнавання, кластеризації, класифікації, аналізу великої кількості даних, що надходять з великою швидкістю від великої кількості пристроїв та датчиків тощо. Здатність до навчання на заданий принцип функціонування дозволяє створювати системи автоматичного керування, оптимальні по швидкодії, енергоспоживанню та ін. Природно, що при цьому можлива реалізація декількох принципів функціонування та перехід з одного на інший. Вони є універсальним засобом для моделювання багатовимірних нелінійних об'єктів та знаходження рішень в некоректних задачах.

Фундаментальні наукові результати в галузі розробки інтелектуальних та нейромережових систем відображені в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених: Вербоса П., Зайченка Ю.П., Кохонена Т.К., Пайперта С., Розенблата Ф., Сарідіса Дж., Стиренка С.Г., Сигеру Омату, Терехова В.А., Терейковського І.А., Федосова Е.А., Федунова Б.Є., Хопфілда Д.Д., Широчина В.П. та ін.

На даний час основним методом реалізації нейромережових систем керування є програмний, за допомогою архітектури Фон Неймана, яка є послідовною, всупереч притаманному паралелізму ШНМ. А також програмна реалізація за допомогою GPU, що дозволила підвищити ефективність програм з ШНМ в порівнянні з архітектурою Фон Неймана. Програмна реалізація нейромережових систем значно звужує коло їх практичного застосування через значну вартість, що робить недоцільним їх використання в вбудованих системах керування технічними об'єктами. Крім того, програмна реалізація має низку швидкодії та потребує значних затрат часу на навчання через необхідність виконання великої кількості послідовних обчислень. Для розв'язання більшості задач, які вирішуються в вбудованих системах керування технічними об'єктами, вимагається висока швидкодія ШНМ та її навчання. Рекурентність і послідовність дій процедури навчання ШНМ, при її реалізації на всій множині налагоджуваних параметрів, не дозволяє повністю вирішити проблему швидкодії ШНМ та процедури навчання в реальному часі. Єдиною альтернативою цьому є розпаралелення процедури навчання та функціонування

внутрішніх елементів ШНМ. Такі можливості з'являються при реалізації ШНМ на програмованих інтегральних логічних схемах FPGA (Field-Programmable Gate Array).

Таким чином є актуальною науково-технічна задача підвищення ефективності апаратної реалізації нейромережових компонентів систем керування динамічними об'єктами, що забезпечують адаптацію та самоналагодження систем керування в реальному часі. Для досягнення цього необхідна розробка нових методів та алгоритмів реалізації апаратних компонентів нейромережових систем керування.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в відповідності з планами науково-дослідних робіт (НДР) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за держбюджетними тематиками: НДР «Розробка методів та засобів проектування і реалізації оптимального та енергозберігаючого керування в багатооб'єктних розподілених технічних комплексах» тема № 2327-п, № ДР 0110U002196, 2010-2011 рр. (автор – виконавець); НДР «Розробка методів і засобів апаратно-програмної реалізації нейроконтролерів на основі програмованих логічних інтегральних схем для побудови інтелектуальних систем керування» тема №2617-п, № ДР 0113U000223, 2013-2014 рр. (автор – виконавець); НДР «Платформа розроблення, експлуатації і розвитку критичних ІТ-інфраструктур для роботи з великими даними», №2919-ф, № ДР 0116U003801, 2016-2018 рр. (автор – виконавець); НДР «Розробка та впровадження системи керування ІТ-інфраструктурою з консолідованими інформаційно-обчислювальними ресурсами»; №2844-п, № ДР 0115U000322, 2014-2016 рр. (автор – виконавець); НДР «Хмарна платформа розроблення і керування функціонуванням критичних ІТ-інфраструктур, що опрацьовують великі обсяги даних» тема №2024-п, ДР 0117U000537, 2017-2019 рр. (автор – виконавець); ДКР «Розробка документації для апаратно-програмного комплексу CashBag System»; № 2/577-18, 2018-2019 рр. (автор – виконавець).

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності нейромережових систем керування за рахунок створення швидкодіючих компонентів, які дозволяють реалізовувати функції ідентифікації, адаптації та керування динамічними об'єктами в реальному часі.

Відповідно до мети в роботі поставлені та вирішені наступні задачі.

1. Аналіз існуючих нейромережових систем керування і основних типів нейронних мереж, які при цьому використовуються, методів їх адаптації та методів, технологій та засобів їх апаратної реалізації.

2. Розробка методу та алгоритмів апаратної реалізації нейронних мереж на багатопотокових обчислювальних системах, для подальшого синтезу на їх базі компонентів нейромережових систем керування.

3. Розробка методу проектування апаратних компонентів нейромережових систем керування.

4. Розробка методу проектування апаратних компонентів контуру адаптації нейромережових систем керування.

5. Побудова та дослідження основних типів нейромережових систем керування динамічними об'єктами на основі розроблених компонентів.

6. Розробка діючого макету нейромережового контролера та впровадження розроблених технологій, методів, засобів та алгоритмів в систему керування динамічним об'єктом.

*Об'єктом дослідження є нейромережеві системи керування динамічними об'єктами.*

*Предметом дослідження є методи та технології автоматизованого проєктування інтелектуалізованих апаратних засобів нейромережевих систем керування динамічними об'єктами.*

*Методи дослідження.* Методологічну основу дослідження становлять фундаментальні положення сучасної теорії автоматичного керування, теорії штучних нейронних мереж та нейромережевих систем керування, еволюційні методи синтезу нейромережних моделей, теорії оптимального та адаптивного керування. Аналіз паралельних процесів та похибки обчислень проводиться з застосуванням елементів математичного аналізу, теорії численних методів, імітаційного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в наступному:

**вперше:**

- розроблено метод проєктування нелінійних функцій активації штучного нейрону на програмованих логічних інтегральних схемах, який відрізняється від існуючих методів проєктування тим, що коефіцієнти шматково-лінійної апроксимації функції активації зберігаються у пам'яті тільки для позитивних або тільки для негативних значень аргументу, що дозволило оптимізувати кількість використаного обчислювального ресурсу та збільшити швидкодію обчислень нейронної мережі;

- розроблено метод проєктування апаратних компонентів нейромережевих систем, таких як пряма та інверсна модель об'єкта керування, на програмованих логічних інтегральних схемах, використанням розроблених методів та засобів, що дозволяє підвищити рівень автоматизації проєктування нейромережевих моделей при їх апаратній реалізації;

- розроблено метод проєктування апаратного компоненту оптимізації вагових коефіцієнтів нейронних мереж за допомогою генетичного алгоритму при реалізації його на програмованих логічних інтегральних схемах, який відрізняється від існуючих реалізацій операцій мутації та кросовера, що дозволяє значно підвищити швидкість оптимізації вагових коефіцієнтів нейронних мереж;

дістав подальший розвиток:

- комплексний формалізований підхід до реалізації багатоетапної процедури ідентифікації складних динамічних об'єктів з використанням нейронних мереж, що відрізняється від існуючих етапом створення сукупності нейромережевих моделей та їх оцінювання, що дозволяє обрати мінімальну структуру нейромережевої моделі для подальшої реалізації та підвищити рівень автоматизації процедури ідентифікації;

**Практичне значення одержаних результатів.** Отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути використані для проєктування контролерів нейромережевих систем керування здатних функціонувати і адаптуватися в реальному часі.

Практична цінність роботи полягає в наступному:

- розроблено алгоритми апаратної реалізації ШНМ прямого розповсюдження та радіально-базисних нейронних мереж (RBF-мереж) на основі програмованих логічних інтегральних схем, що дозволяють підвищити швидкодію таких апаратних блоків, зменшити кількість обчислювального ресурсу необхідного для їх реалізації та підвищити точність;

- розроблено технологію та програмний пакет для дослідження та оцінки нейромережевих моделей багатовимірних об'єктів керування для їх подальшої реалізації;

- розроблено узагальнену структурну схему нейроконтролера на основі програмованих логічних інтегральних схем, що реалізує базові компоненти нейромережових систем керування;

- реалізовано макет нейроконтролера для системи стабілізації рухомого об'єкта на обмеженій площині та проведено його дослідження, які підтвердили високу ефективність роботи.

Результати впроваджені при розробці системи управління IT-інфраструктурою ТОВ «СІТУС ПРО». За допомогою технології та програмного забезпечення «МІМО-plant» обрано оптимальну структуру ШНМ в підсистемі інтелектуального управління консолідованими інформаційно-обчислювальними ресурсами, що дозволило підвищити ефективність консолідованих інформаційно-обчислювальних систем на 8% при забезпеченні стабільного рівня якості надання користувачам інформаційно-телекомунікаційних послуг.

Розроблена технологія та програмне забезпечення «МІМО-plant» впроваджена в автоматизовану систему проєктування IT-інфраструктури ТОВ «АЙАДМІН», це дозволило змодельовати і прогнозувати навантаження в корпоративній IT-інфраструктурі, що проєктується. Крім того це дозволяє підвищити рівень автоматизації та інтелектуалізації спеціального програмного забезпечення для автоматизованого проєктування корпоративної IT-інфраструктури ТОВ «АЙАДМІН» та скоротити часові затрати на проєктування на 20%. Моделювання і прогнозування навантаження в корпоративній IT-інфраструктурі здійснюється за рахунок автоматичного підбору структури штучної нейронної мережі та її навчання, по бажаним параметрам корпоративної IT-інфраструктури, що проєктується.

Результати впроваджені у навчальний процес кафедри автоматики та керування в технічних системах КПП ім. Ігоря Сікорського, починаючи з 2013-2014 навчального року вони використовуються в матеріалах лекцій з навчальних дисциплін «Теорія штучного інтелекту в управлінні», в якій введено новий розділ «Технології реалізації нейромережових систем керування», та «Проєктування комп'ютеризованих систем керування», а також при проведенні курсового та дипломного проєктування.

**Особистий внесок здобувача.** Дисертаційна робота виконана автором самостійно на основі особистих розробок. При використанні результатів досліджень інших авторів використовувалися посилання на відповідні літературні джерела.

**Апробація результатів дисертації.** Матеріали дисертації доповідались і обговорювались на наступних конференціях: Ювілейна міжнародна науково-практична конференція «Розподілені комп'ютерні системи» (Київ, НТУУ «КПІ», 2010 р.); X-та міжнародна науково-практична конференція «Контроль та керування складними системами» (Вінниця, ВНТУ, 2010 р., 2012 р.); 73 міжнародна конференція «Вагони нового покоління: із XX в XXI сторіччя» (Харків, 2011); Міжнародна конференція «Системний аналіз та інформаційні технології» (Київ, НТУУ «КПІ», 2011, 2012, 2013); Міжнародна конференція «Обчислювальний інтелект – 2011» (Черкаси, ЧДТУ, 2011 р.); Міжнародна конференція з автоматичного керування «АВТОМАТИКА/ AUTOMATICS – 2011» (Львів, НУ «Львівська політехніка», 2011); XIII та XIV міжнародній науковій конференціях імені Т.А. Таран «Інтелектуальний аналіз інформації» (Київ, НТУУ «КПІ», 2013, 2014); XXI Міжнародна конференція з автоматичного керування «АВТОМАТИКА/ AUTOMATICS – 2014» (Київ, НТУУ «КПІ», 2014); I Міжнародна конференція присвячена 70-річчю кафедри автоматики та керування в технічних системах, м. Київ, 24-25 листопада 2015 р.; Congress

on Information Technology, Computational and Experimental Physics December 18-20, 2015 Cracow, Poland; The Fourth International Conference on 'Automatic Control and Information Technology' (ICACIT'17) December 14-16, 2017, Cracow, Poland; 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Bucharest, Romania, 2017; The First International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA2018) 18-20 January 2018, Kiev, Ukraine; Одинадцята міжнародна науково-практична конференція з програмування УкрПРОГ'2018, Україна, Київ, 22-24 травня 2018 р.; The Second International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA2019) 26-27 January 2019, Kyiv, Ukraine, 2020 IEEE 7th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ENERGY SMART SYSTEMS, April 23-25, 2020 Kyiv, Ukraine.

**Публікації.** Результати досліджень за тематикою дисертації опубліковано у 38 наукових працях, з яких 15 наукових статей (з них 4 статті у періодичних наукових виданнях інших держав, які входять до ОЕСР та/або Європейського Союзу, з яких 3 наукові статті у проіндексовані у наукометричній базі Scopus, в тому числі 2 статті в журналах 3-го квартіля (Q3) та 1 стаття в журналі 4-го квартіля (Q4), 10 статей у наукових фахових виданнях України та 1 стаття в інших наукових виданнях України) та 23 публікації в матеріалах наукових та науково-технічних конференцій (в тому числі 3 публікації в матеріалах наукових конференцій, що реферуються наукометричними базами Scopus та/або Web of Science, і у 20 матеріалах інших наукових конференцій в Україні та за кордоном).

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку літератури, який містить 158 найменувань вітчизняних та зарубіжних джерел, додатків. Загальний обсяг дисертації становить 152 сторінок, з яких 131 сторінку основного тексту. Робота містить 10 таблиць та 66 рисунків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність напряду досліджень, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і задачі досліджень, визначено наукову новизну отриманих результатів і практичне значення та цінність роботи, наведено відомості про апробацію отриманих результатів.

У **першому розділі** виконано аналіз галузей застосування апаратних засобів з ШНМ, основних структур нейромережових систем керування динамічними об'єктами. На основі аналізу встановлено, що нейромережові системи керування складаються з прямих та інверсних моделей об'єкта керування та компоненту їх адаптації.

На основі аналізу ШНМ встановлено, що на сьогоднішній день розроблено та досліджено декілька десятків типів ШНМ, але основними, принципово різними типами є три типи мереж, це RBF-мережі, динамічні мережі Хопфілда та мережі прямого розповсюдження. Данні ШНМ, завдяки своїм властивостям, можуть бути використані для подальшого проектування на їх основі прямих та інверсних моделей об'єкта керування.

Проаналізовано існуючі на сьогодні методи та алгоритми навчання ШНМ. На основі аналізу встановлено, що використання генетичного алгоритму для навчання нейромережових компонентів СК є найбільш оптимальним при апаратній реалізації.

Проведено аналіз сучасного стану програмних, апаратних і апаратно-програмних засобів реалізації ШНМ. В результаті проведеного аналізу встановлено, що засоби реалізації нейромережових систем керування повинні орієнтуватися на широке застосування в

промислових умовах, бути універсальними і гнучкими, функціонувати та навчатися в реальному часі, бути простими і дешевими, тому найбільш перспективними засобами можна вважати FPGA. Проведено огляд основних робіт по реалізації ШНМ засобами FPGA.

У **другому розділі** запропоновано метод проектування нелінійних функцій активації штучного нейрону на FPGA. На базі запропонованого методу розроблено алгоритми апаратної реалізації штучного нейрона з сигмоїдальною функцією активації та нейрона прихованого шару RBF-мережі з функцією активації Гауса. Проведено дослідження реалізованих штучних нейронів та ШНМ. Показано, що за рахунок розробленого методу та алгоритмів забезпечується значна оптимізація використаного ресурсу, збільшується швидкість обчислень апаратних блоків з ШНМ та їх точність в порівнянні з аналогами.

Однією з проблем при апаратній реалізації НСК є реалізація штучного нейрона і його активаційних функцій засобами FPGA. Найскладнішою з погляду цифрової реалізації є сигмоїдальні функції активації, які є нелінійними:

$$f(x, 0, 1, -1, 1) = 0 + \frac{1}{1 + 1e^{-1x}} = \frac{1}{1 + e^{-x}}. \quad (1)$$

При розробленні методу та алгоритмів реалізації нейронів з сигмоїдальною функцією активації слід мати на увазі особливості будови ПЛІС, яка має ресурси ЛТ, мультиплекси, суматори, блоки множення, але не має блоків поділу. Нейрон повинен мати необхідну точність обчислень і розрядність вхідних даних.

В дисертації запропоновано наступний метод проектування на FPGA функцій активації штучного нейрону. Вхідними даними для методу є функції, що описуються формулою (1), або ті які можуть бути через них записані та точність з якою має бути реалізована функція активації.

**На першому етапі** виконується дослідження функції активації на симетричність відносно осей. Розглянемо функцію (1)

$$f(-x) = 1 - f(x) = 1 - \frac{1}{1 + e^{-x}} = 1 - \frac{1}{1 + \frac{1}{e^x}} = 1 - \frac{e^x}{e^x + 1} = \frac{e^x + 1}{e^x + 1} - \frac{e^x}{e^x + 1} = \frac{1}{e^x + 1},$$

отримаємо:

$$1 - \frac{1}{1 + e^{-x}} = \frac{1}{1 + e^x}, \quad \text{або} \quad 1 - f(x) = f(-x). \quad (2)$$

Можемо розглядати  $f(x)$  тільки для позитивних аргументів. Для його негативних значень можна знайти за формулою (2), що в свою чергу прискорить обчислення значення функції і зменшить займаний ресурс FPGA.

**На другому етапі** задаємо шматково-лінійну функцію на кожному з інтервалів  $(-\infty; x_1), (x_1; x_2); \dots (x_n; +\infty)$  окремою формулою. Записується це у вигляді:

$$f(x) = \begin{cases} k_0x + b_0, & x < x_1 \\ k_1x + b_1, & x_1 < x < x_2 \\ \dots & \dots \\ k_nx + b_n, & x_n < x \end{cases}. \quad (3)$$



**На третьому етапі** розрахунок значення  $f(x)$ , для раніше розрахованого значення  $x$ , з пам'яті, вибираються коефіцієнти  $k$  і  $b$  формули (3), для негативних аргументів, значення функції розраховується за формулою (2).

Таким чином, на основі лінійних формул можемо знайти апроксимацію функції сигмоїдальної типу для будь-якого аргументу із заданою точністю.

На основі запропонованого методу розроблені алгоритми для апаратної реалізації штучного нейрону з сигмоїдальною функцією активації та нейрона RBF нейромережі з функцією активації Гауса.

На рис. 1 представлено сигмоїдальну функцію за формулою (1), графік *а*, та функцію реалізовану в FPGA за розробленим алгоритмом, графік *б*. В порівнянні отриманих результатів з результатами з найближчого аналогу (Karan Goel et al (2014)), ресурс FPGA

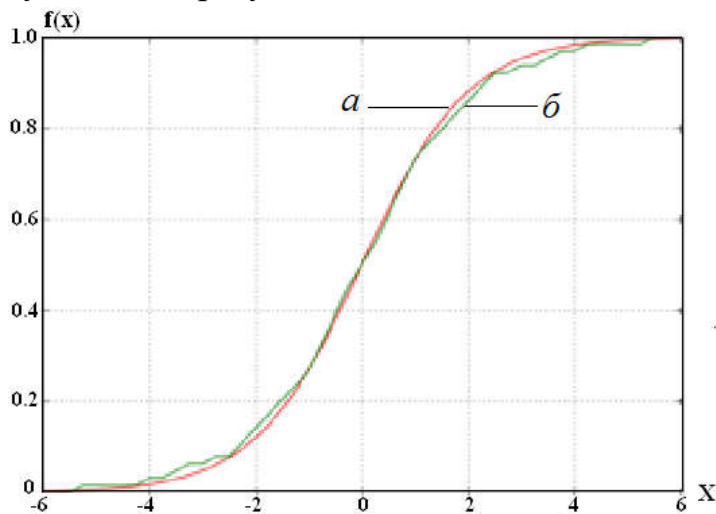


Рис. 1 – Графік сигмоїдальної функції, реалізованої в FPGA

у порівнянні з результатами з найближчого аналогу (Seema Singh et al (2015)), ресурс FPGA (LUT) – 336, час обчислення 120.1 нс та максимальне відхилення 0,556%, по реалізації сигмоїдальної функції активації на чіпі сімейства Xilinx Spartan 3, зменшено використаний ресурс FPGA до 75 LUT, зменшено час обчислення до 30.2 нс та максимальне відхилення зменшено до 0,45%.

Реалізований за розробленим алгоритмом штучний нейрон з 4-ма входами і сигмоїдальною функцією активації на FPGA Xilinx Spartan 3 з використанням 16-розрядних чисел

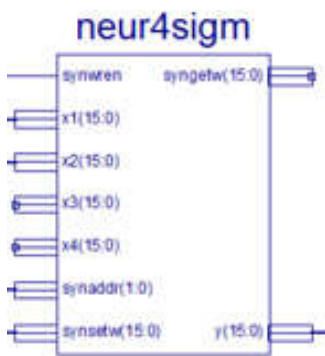


Рис. 2 – Блок штучного нейрона в FPGA

з фіксованою точкою зайняв 672 LUTs. Швидкодія, як сумарна затримка комбінаційної схеми блоку нейрона, склала 75.6 нс. Штучний нейрон розроблений на FPGA як окремий обчислювальний блок та представлений на рис. 2. Результати моделювання штучного нейрону на FPGA різних серій наведено в дисертації.

Розроблені та промодельовані на FPGA ШНМ прямого поширення, відповідний займаний ними ресурс FPGA в кількості вентилів логічної матриці LUTs, швидкодія та похибка, представленні в таблиці 1. ШНМ представлені трьома числами, які визначають кількість нейронів в вхідному, прихованому і вихідному шарах відповідно. В порівнянні з роботою(Seema Singh et al (2015)) де представлена ШНМ 3-2-1, що займає 1125 LUT, реалізована в цій

роботі мережа займає 819 LUT обчислювального ресурсу FPGA.

Таблиця 1 – Результати моделювання нейронних мереж в FPGA

Нейронна мережа	Кількість синапсів	Ресурс FPGA (LUT)	Вихідне значення ШНМ		Похибка	Швидкодія, нс
			MatLab	FPGA		
1-2-1	5	585	0.62573413	0.609375	0.016359	126.216
1-3-2	10	723	0.68372392	0.671875	0.011849	127.772
1-5-1	11	523	0.78328235	0.765625	0.017657	128.754
2-4-2	18	899	0.75747616	0.75	0.007476	133.601
3-5-1	23	725	0.82549114	0.796875	0.028616	134.047
3-2-1	11	819	0.65058263	0.625	0.025583	134.138
2-8-2	34	1369	0.907020339	0.890625	0.016395	163.237

Реалізація нейронних мереж Хопфілда на ПЛІС відрізняється від апаратної реалізації ШНМ прямого розповсюдження введенням додаткових зворотних зв'язків і елементів затримки в часі на цих зв'язках, що, в свою чергу, займає більше простору на ПЛІС.

В дисертації розроблено алгоритм апаратної реалізації на FPGA штучного нейрона RBF-мережі з прихованим шаром з функціями Гауса на основі розробленого методу реалізації функцій активації.

В дисертації переставлено результати моделювання функції Гауса на FPGA різних серій. При конфігурації функції Гауса на FPGA Xilinx Virtex 6 використано ресурсу чіпу 39 LUTs, швидкодія 0.56нс. Похибка абсолютна складає  $\pm 0.005$  при реалізації функції Гауса за допомогою 16-ти розрядних чисел з фіксованою точкою. Розроблена та досліджена серія RBF-мереж, що складаються з двох шарів, прихованого шару функцій Гауса та вихідного шару з нейронами з сигмоїдальною функцією активації, результати моделювання представлені на рис. 3. В дисертації наведене порівняння реалізації RBF-мереж з найблищим аналогом, показано підвищення швидкодії та оптимізація використаного ресурсу FPGA. В порівнянні з роботою (Alisson C.D. de Souza (2014)), де реалізована RBF-мережа 2-1, ресурс FPGA (LUT) – 1170, час обрахунку 41.26нс при реалізації на чіпі

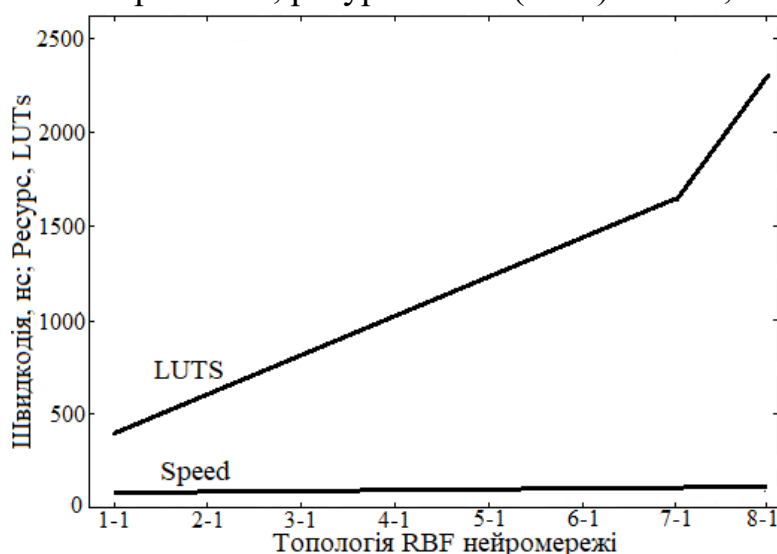


Рис. 3 – Графік залежності кількості використаного ресурсу від кількості нейронів та швидкодії RBF-мережі від кількості нейронів

Virtex-6, зменшено використаний ресурс FPGA до 257 LUT, зменшено час обрахунку до 27.524нс.

Реалізовані ШНМ за розробленими методом та алгоритмами, за результатами моделювання показали високу точність та швидкодію. Розроблені в даному розділі метод та алгоритми синтезу можуть бути базовими для подальшого синтезу нейромережових компонентів, таких як пряма та інверсна моделі, систем керування динамічними об'єктами на основі FPGA. Апаратна реалізація ШНМ з такою швидкістю дозволяє їм використовувати в реальному часі обчислювальні системи в

управлінні швидкодіючими об'єктами.

У **третьому розділі** розроблено технологію для побудови, дослідження та оцінки нейромережових моделей багатовимірних об'єктів керування для їх подальшої реалізації. Розроблено метод проектування апаратних компонентів, таких як пряма та інверсна модель об'єкта керування, нейромережових систем керування, які є базовими для структурного синтезу систем керування, для обчислення векторів стану об'єкта і формування функції керування ним. Розроблено метод оптимізації вагових коефіцієнтів ШНМ за допомогою генетичного алгоритму при реалізації на FPGA, що дозволяє значно підвищити швидкість адаптації прямої та інверсної моделі об'єкта керування.

В даному розділі дістав подальший розвиток комплексний формалізований підхід до реалізації багатоетапної процедури ідентифікації багатовимірних динамічних об'єктів з використанням нейронних мереж. Відрізняється від існуючих етапом створення сукупності нейромережових моделей та їх оцінювання. Результатом отриманим за допомогою цієї технології є сукупність нейромережових моделей з оцінкою їх точності по параметрам вхід-вихід. Це дозволяє обрати мінімальну структуру нейромережової моделі, що задовольняє умови точності відтворення об'єкта. Для подальшої апаратної реалізації та пришвидшення роботи та навчання таких моделей важливим параметром є мінімальна архітектура моделі.

Властивості ШНМ з динамічними алгоритмами навчання дозволяють моделювати складні нелінійні динамічні об'єкти керування – у вигляді прямих та інверсних моделей по вимірах «вхід-вихід» цього об'єкта. Обидві моделі використовуються для обчислення векторів стану об'єкта і формування функції керування ним.

В дисертації розроблено наступний метод синтезу апаратних компонентів систем керування на основі ШНМ на прикладі реалізації нейромережової моделі об'єкта керування. Метод проектування нейромережових моделей об'єкта керування при їх апаратній реалізації на FPGA виконується наступним чином:

**Етап 1.** Проведення експерименту. Основним завданням є побудова інформативної множини даних  $Z$ , придатної для побудови працездатної моделі:

$$Z^N = \{[u(t), y(t)], t = \overline{1, N}\}, \quad (4)$$

де:  $u(t)$  – тестовий сигнал;  $y(t)$  – реакція об'єкту на тестовий сигнал;  $t$  – час;  $N$  – розмірність множини  $Z$ .

Побудова інформативної множини даних  $Z$  може бути виконана шляхом імітаційного моделювання (у випадку якщо модель об'єкту відома) або шляхом проведення серії експериментів з реальним об'єктом (у випадку, якщо модель об'єкту не відома.).

Для нелінійних об'єктів надзвичайно важливо, що б в множині експериментальних даних  $Z^N$  були представлені всі можливі комбінації амплітуд і частот з робочого діапазону системи. Один з можливих варіантів тестового сигналу, що задовольняє вказаним вимогам, описується виразом:

$$u(t) = u(t - N) + e \left( \text{int} \left[ \frac{t-1}{N} \right] + 1 \right), t = 1, 2, \dots \quad (5)$$

де:  $e(t)$  – білий шум з дисперсією  $\sigma_e^2$ .

Іншим варіантом тестового сигналу є синусоїда з наростаючою частотою  $\omega_c$  і амплітудою  $A_c$ , що змінюється:

$$\begin{aligned} u(t) &= u_0 + A_c \sin(\omega_c t), \\ \omega_c &= \omega_n + \frac{(\omega_k - \omega_n)}{N}, \\ A_c &= A_n + \frac{(A_k - A_n)}{N}, \end{aligned} \quad (6)$$

де  $\omega_n$ ,  $\omega_k$  – відповідно початкове і кінцеве значення частоти синусоїдального сигналу;  $A_n$ ,  $A_k$  – відповідно початкове і кінцеве значення амплітуди синусоїдального сигналу.

Для ефективного використання отриманої тестової множини експериментальних даних необхідно виконати його попередню обробку (фільтрацію, видалення надмірних даних і викидів, масштабування), метою якого є отримання найбільш значущої інформації і приведення її до певного вигляду, необхідного для навчання нейромережевої моделі.

**Етап 2.** Вибір області можливих модельних структур. Під модельною структурою розумітимемо структуру нейронної мережі, яка може бути умовно розділена на «внутрішню структуру» і «зовнішню структуру».

Внутрішня структура нейронної мережі визначається: топологією мережі, кількістю прихованих шарів, числом нейронів і видом активаційних функцій в кожному шарі.

Зовнішня структура нейронної мережі визначається вектором входу  $\phi(t)$  (регресором). Вектор входу  $\phi(t)$  нейронної мережі можна представити як:

$$\phi(t) = [\phi_1 \dots \phi_k]^T = [\phi_1(t-1) \dots \phi_1(t-d_1) \dots \phi_k(t-1) \dots \phi_k(t-d_k)]^T, \quad (7)$$

де:  $\phi_k$  –  $k$ -а компонента регресора;  $d_k$  – «глибина» регресора.

Під вибором регресора мається на увазі визначення компонент регресора  $\phi_k$  і глибини регресії  $d_k$ , тобто кількості  $d$  значень  $k$ -ої компоненти регресора в попередні значення часу. У якості компонент регресора зазвичай використовуються ті параметри системи (процесу), які можуть бути безпосередньо виміряні (або оцінені) в режимі функціонування. Наприклад, для одновимірних об'єктів в якості компонентів регресора використовується значення входу  $u(t)$  і виходу  $y(t)$  об'єкту. Вибір глибини регресії визначається динамікою об'єкта.

Таким чином, завдання вибору структури нейронної мережі зводиться до визначення «глибини» регресора  $\phi(t)$  («зовнішня» структура) і кількості нейронів прихованого шару  $n$  («внутрішня» структура) багатошарової нейронної мережі, що містить один прихований шар нейронів з сигмоїдальними функціями активації і вихідний шар з лінійними функціями активації.

Визначення області «можливих» модельних структур  $V(n, \phi_1, \dots, \phi_k)$  в області модельних структур  $M(n, \phi_1, \dots, \phi_k)$ , виконується на основі аналізу апіорної інформації про об'єкт і його динаміку.

**Етап 3.** Оцінка моделей з області можливих модельних структур. Для оцінки моделей з області можливих модельних структур використовується модифікований комплексний формалізований підхід до реалізації багатоетапної процедури побудови нейромере-

жевих моделей складних динамічних об'єктів, який описаний в розділі 3.1. Розроблений на його базі програмний пакет «MIMO-Plant» в середовищі MatLab. Процес оцінки моделей полягає в наступному, для кожної моделі з області  $V(n, \varphi_1, \dots, \varphi_k)$  обчислюється значення критерію адекватності, у якості якого можна використовувати значення середньоквадратичної помилки. За критерієм середньоквадратичної та складністю моделі обирається модель із області можливих модельних структур  $V(n, \varphi_1, \dots, \varphi_k)$ .

**Етап 4.** Реалізація нейромережевої моделі на FPGA. Для апаратної реалізації нейромережевої моделі на FPGA, обраної на третьому етапі, використовуються метод та алгоритми апаратної реалізації ШНМ розроблені та описані в другому розділі дисертації.

**Етап 5.** Оцінка «вартості» реалізації моделі на FPGA. Для вибраної моделі обчислюється значення критерію «вартості» апаратної реалізації нейромережевої моделі на FPGA. Під «вартістю» реалізації  $C$  в даному випадку розуміється частина ресурсів (Slices), кількість D-тригерів (Flip Flops), об'єм вбудованої блокової пам'яті (BRAM), кількість чотиревходових таблиць перетворення (Look-up Table)), необхідних для реалізації отриманої моделі на вибраному типі кристала FPGA:

$$C = \max \left( \frac{\sum_{i=1}^I S_i}{S_X}, \frac{\sum_{i=1}^I F_i}{F_X}, \frac{\sum_{i=1}^I R_i}{R_X}, \frac{\sum_{i=1}^I L_i}{L_X} \right), \quad (8)$$

де:  $S_i, F_i, R_i, L_i$  – кількість Slices, Flip Flops, BRAM, Look-up Table, відповідно, що необхідна для реалізації нейромережевої моделі;  $S_X, F_X, R_X, L_X$  – кількість Slices, Flip Flops, BRAM, Look-up Table, відповідно, яка міститься у вибраному кристалі FPGA;  $I$  – сумарна кількість елементів (ваги, зсуви, функції активації, затримки) тих, що реалізують нейронну мережу. Умовою реалізуємості нейромережевої моделі на вибраному кристалі FPGA є виконання нерівності

$$C < 1. \quad (9)$$

**Етап 6.** Прийняття рішення про можливість практичної реалізації. Якщо отримана модель не задовольняє якомусь критерію, необхідно виконати попередні кроки алгоритму побудови моделі, аж до проведення нової серії експериментів.

Відповідно до даного алгоритму, якщо умова (9) виконується, то дану модель можна реалізувати на вибраному кристалі FPGA, перейти на етап 8, якщо ж умова (9) не виконується, то модель на такому кристалі FPGA реалізувати неможливо. В цьому випадку забезпечити виконання умови (9) можна наступним чином: виконати процедуру оптимізації структури моделі, перейти на етап 7; вибрати кристал FPGA більшої ємності і/або іншого сімейства; збільшити число кристалів FPGA.

**Етап 7.** Оптимізація структури моделі. Оптимізація структури нейромережевої моделі проводиться шляхом видалення ряду малозначних вагових коефіцієнтів. Для реалізації цього можуть бути використані такі алгоритми: алгоритм послідовного зменшення структури; алгоритм послідовного збільшення структури; генетичний алгоритм; Optimal Brain Damage (OBD); Optimal Brain Surgeon (OBS).

Останній алгоритм є найбільш відомим і широко поширеним. Після виконання мінімізації структури необхідно заново оцінити адекватність моделі етап 3 і виконати етапи 4, 5, 6.

**Етап 8.** Синтез конфігурацій. На даному етапі засобами пакету САПР синтезуються конфігурації для прошивки FPGA.

Запропонований метод проєктування прямої та оберненої нейромережевої моделі об'єкта керування при їх апаратній реалізації на FPGA, дозволяють прискорити та автоматизувати процес проєктування таких компонентів нейромережевих систем керування, що реалізують функції ідентифікації, адаптації та керування динамічними об'єктами в реальному часі.

В третьому розділі розроблено метод проєктування апаратного компоненту оптимізації вагових коефіцієнтів ШНМ за допомогою генетичного алгоритму при реалізації його на FPGA, який відрізняється від існуючих реалізацією операцій мутації та кросовера.

Порівняння отриманих результатів моделювання апаратного компоненту оптимізації вагових коефіцієнтів нейронних мереж за допомогою генетичного алгоритму з еквівалентними результатами, виявленими у аналогічних опублікованих роботах, представлені в таблиці 2. Порівняння були зроблені з якомога більшою подібністю параметрів та реалізовані на однаковому чіпі FPGA. У таблиці представлений стовпець із порівняльними посиланнями – автори та рік публікації, наступні два стовпці показують параметри генетичного алгоритму в відповідних посиланнях,  $N$  – розмір хромосоми,  $K$  – кількість епох генетичного алгоритму. В наступних стовпчиках показані часи, отримані роботами на аналогічному чіпі, результати отримані тут, також відображаються відповідні прискорення.

Таблиця 2 – Порівняння отриманих результатів з іншими результатами

Посилання	$N$	$K$	$T_1$	$T_2$	Прискорення
M.S.B. Ameur, A. Sakly(2017)	20	380	74 мс	0,285 мс	260
L. Guo et al (2015)	32	200	1,6 мс	0,2 мс	8
F.Mengxu, T. Bin (2015)	64	500	0,941 мс	0,625 мс	1,5
H. Merabti, D. Massicotte (2014)	16	256	0,8 мс	0,23 мс	3,5

З результатів моделювання можна зробити висновок, що розроблений метод навчання нейронних мереж генетичним алгоритмом при апаратній реалізації на FPGA дозволяє значно збільшити швидкість адаптації нейромережевих компонентів систем керування чим підвищить їх ефективність.

**У четвертому розділі** реалізовано та досліджено на основі розроблених компонентів: системи керування без зворотного зв'язку; системи керування з зворотнім зв'язком; адаптивну систему керування із прямою та інверсною моделями об'єкта керування; адаптивну нейромережеву систему керування з еталонною моделлю; розроблено макет діючого нейроконтролера системи стабілізації рухомого об'єкта на обмеженій площині.

При дослідженні систем керування доведено, що розроблені нейромережеві компоненти дозволяють будувати адаптивні системи керування складними багатовимірними об'єктами. Побудовані нейроконтролери, за розробленими методами, можуть функціонувати та адаптуватися в режимі реального часу та формувати функції керування високої складності за рахунок використання оптимальних, за складністю, нейронних мереж, що реалізуються на обчислювальних засобах з високою швидкістю і розпаралеленими об-

числювальними процедурами. Побудова та моделювання нейромережевих систем керування була виконана на програмному забезпеченні Xilinx ISE Design Suite 13.2 та промодельована в ISE Simulator (ISim) з використанням чіпа сімейства Spartan 3 – XC3S200.

Розроблено узагальнену структурну схему нейроконтролера на основі FPGA, що реалізує базові компоненти нейромережевих систем керування. До складу нейроконтролера входять: FPGA – програмована логічна інтегральна схема; МК – мікроконтролер; модуль вводу аналогових сигналів; модуль виводу аналогових сигналів; модуль вводу дискретних сигналів; модуль виводу дискретних сигналів; модуль пам'яті; модуль інтерфейсів; модуль керування та індикації; генератор. Узагальнена структурна схема нейроконтролера представлена на рис. 4.

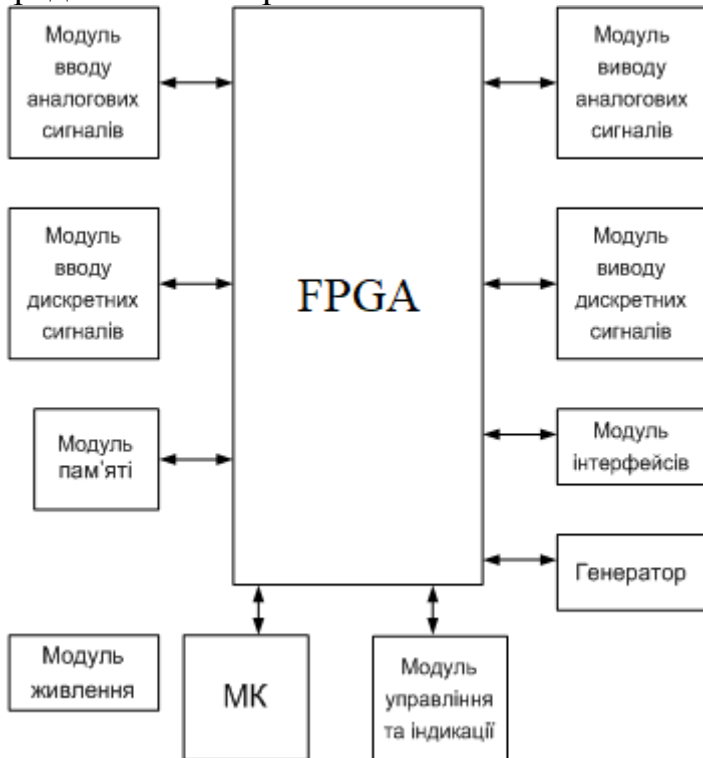


Рис. 4 – Узагальнена структурна схема нейроконтролера

платформи, закріплена система відліку, в той час як  $x'-y'-z'$  є проміжними.

Для проведення натурних досліджень можливостей нейроконтролера було виготовлено у відповідності з даною узагальненою структурною схемою діючий макет нейроконтролера. На його основі створено систему керування і стабілізації рухомого динамічного об'єкта у вигляді кульки, що рухається на рухомій обмеженій площині. Такий об'єкт керування (кулька на рухомій платформі) є складним нелінійним об'єктом, а система керування його положенням на площині відноситься до класу нелінійних динамічних систем.

Модель керованого об'єкта представлена на рис. 5, де  $X-Y-Z$  є підставою рами. Платформа має два ступені свободи, а її орієнтація визначається двома кутами ( $q_1$  і  $q_2$ ), які представляють собою тіла обертання. Рамка  $x''-y''-z''$  є

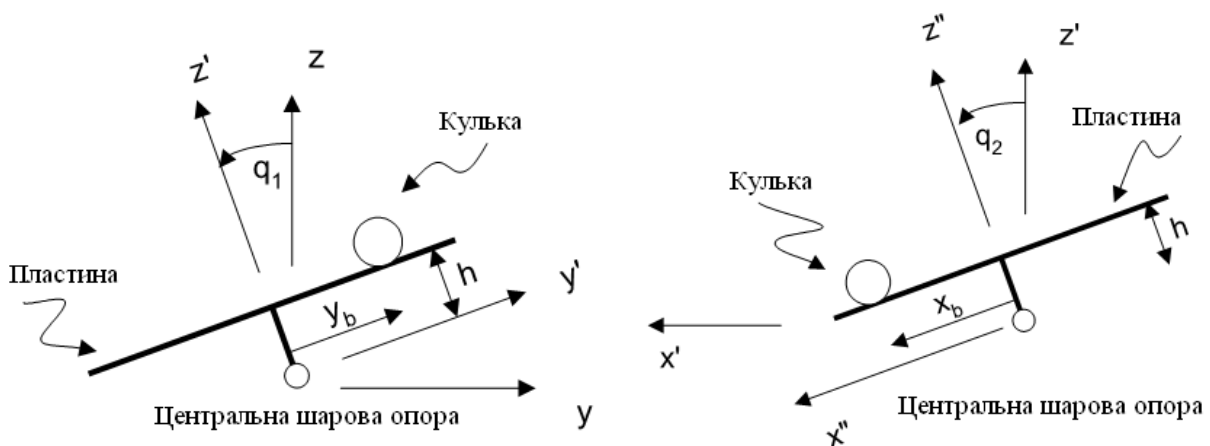


Рис. 5 – Фізичне моделювання руху кульки на платформі



Схема просторового зв'язку показана на рис. 6. З'єднання жорстко прикріплене до основи пластини, з'єднане з землею в точці О. Два двигуни з'єдані з тягами нерухожими з'єднаннями, решта на шарових шарнірах. Загальний вигляд представлено на рис. 7.

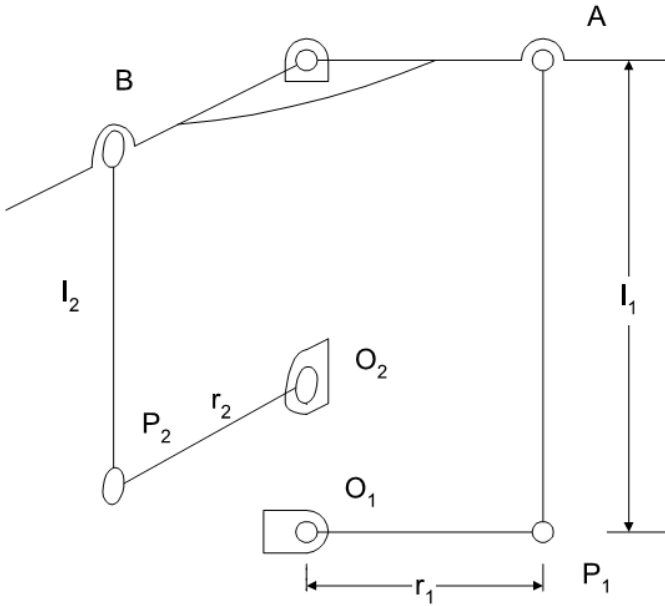


Рис. 6 – Механізм керування платформою



Рис. 7 – Загальний вигляд стенда

Розрахунок ступеня свободи: кількість твердих тіл ( $N$ ) = 5; кількість осей ( $P$ ) = 2; кількість U-образних сполук ( $U$ ) = 1; кількість шарових з'єднань = 4;

Рівняння руху для цієї системи можуть бути отримані з кінематичних рівнянь, які трансформують кут повороту валів двигунів в кут повороту платформи, за допомогою законів Ньютона або рівнянь Лагранжа. Для цього випадку ці методи були використані для перевірки остаточних результатів. Повна нелінійна модель системи визначається за формулами:

$x$  – координата:

$$m_b g r_b \sin q_2 \cos q_1 - m_b r_b \left[ (h + r) \ddot{q}_2 - y_b \ddot{q}_1 \sin q_2 - x_b \dot{q}_2^2 - x_b \dot{q}_1^2 \sin^2 q_2 + \right. \\ \left. + (h + r_b) \dot{q}_1^2 \sin q_2 \cos q_2 - 2 \dot{y}_b \dot{q}_1 \sin q_2 + \ddot{x}_b \right] - \\ - I_b ((\ddot{x}_b / r_b) + \ddot{q}_2) = 0 \quad (8)$$

$y$  – координата:

$$m_b g r_b \sin q_1 - \\ - m_b r_b \left[ x_b (\ddot{q}_1 \sin q_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_1 \cos q_2) - (h + r_b) (\ddot{q}_1 \cos q_2 + \dot{q}_2 \dot{q}_1 \sin q_2) + \right. \\ \left. + \dot{q}_2 \dot{q}_1 (h + r_b) \sin q_2 - \dot{y}_b \dot{q}_1^2 + x_b \dot{q}_2 \dot{q}_1 \cos q_2 + 2 \dot{x}_b \dot{q}_1 \sin q_2 + \ddot{y}_b \right] - \\ - I_b (\ddot{y}_b / r_b + \ddot{q}_1 \cos q_2 \dot{q}_2 \dot{q}_1 \sin q_2) = 0 \quad (9)$$

Рівняння руху є нелінійними та малопридатні для синтезу системи керування на базі лінійної теорії керування. Такий об'єкт керування, як кулька на платформі, є складним нелінійним динамічним об'єктом, тому для керування ним розроблено нейромережеву систему керування з зворотнім зв'язком, що представлена на рис. 8, схема керування ним є класичною схемою спеціалізованого інверсного навчання.



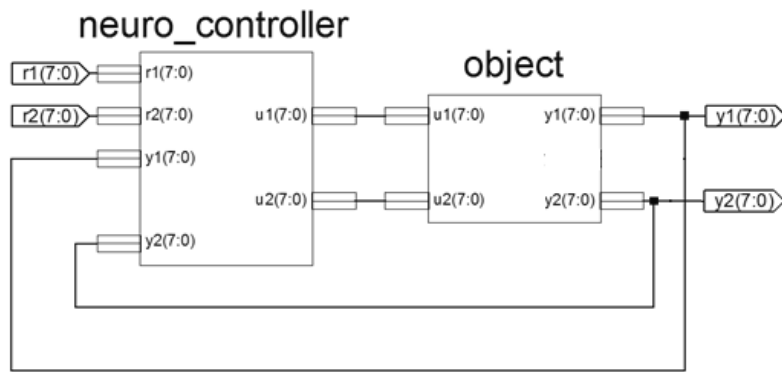


Рис. 8 – Модель НСК положенням кульки на платформі

Розроблена в дисертації НСК положенням кульки на платформі функціонує та адаптується в режимі реального часу та забезпечує заданий рух кульки або її стабілізацію в заданій точці площини. Результати, отримані при моделюванні процесом керування положенням кульки на платформі, показані на рис. 9 та 10.

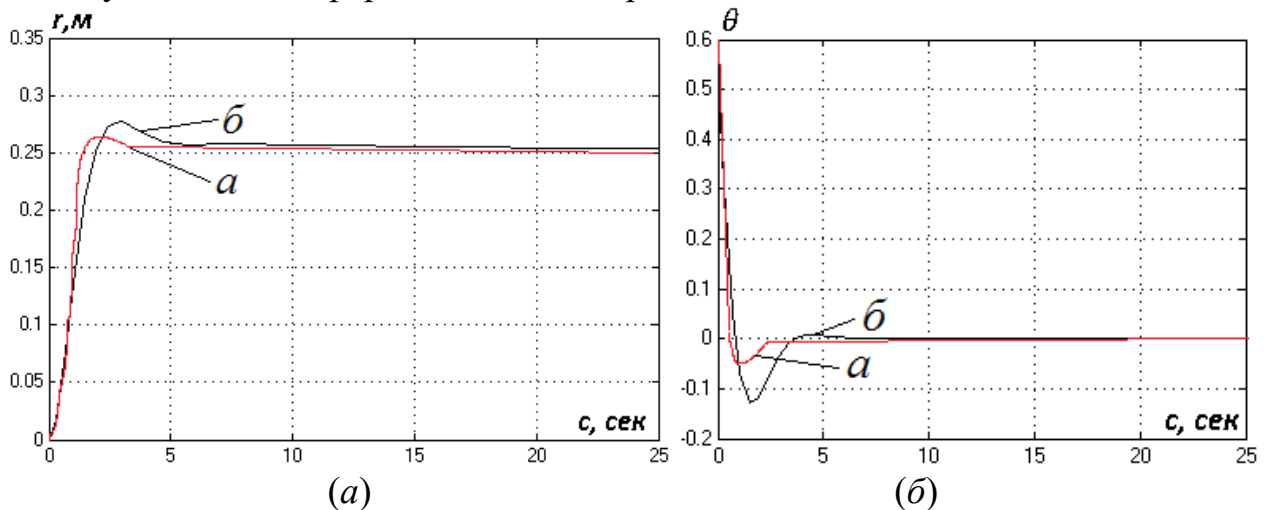


Рис. 9 – Моделювання керування рухом кулі на платформі з НСК: (а) графік положення кулі, залежно від кута повороту серводвигуна, (б) графік кута повороту серводвигуна, залежно від часу.

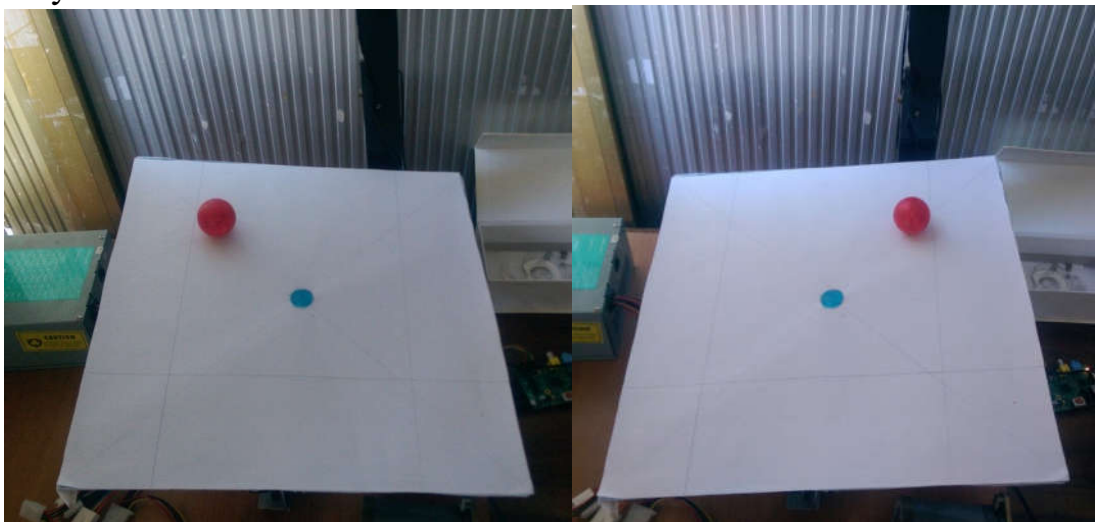


Рис. 10 – Процес керування кульки на платформі за допомогою контролера на FPGA

На рис.9а та рис.9б графіки *a* – перехідні процеси системи керування кулькою на платформі з НСК[1], графіки *б* – перехідні процеси системи керування кулькою на плат-

формі з ПІД-регуляторами [3]. Проведений аналіз швидкісних характеристик роботи реалізованих, промодельованих та досліджених нейромережових системах керування показав їх високу ефективність та швидкодію.

## **ВИСНОВКИ**

В дисертаційній роботі отримано нове вирішення науково-технічної задачі підвищення ефективності роботи компонентів нейромережових систем керування, які дозволяють синтезувати нейромережові системи керування, що функціонують та адаптуються в режимі реального часу з врахуванням специфіки завдань керування.

При цьому здобуті такі теоретичні та практичні результати.

1. Вперше розроблено метод проектування нелінійних функцій активації штучного нейрону на програмованих логічних інтегральних схемах, який відрізняється від існуючих методів проектування тим, що коефіцієнти шматково-лінійної апроксимації функції активації зберігаються у пам'яті тільки для позитивних або тільки для негативних значень аргументу, що дозволило оптимізувати кількість використаного обчислювального ресурсу та збільшити швидкодію обчислень нейронної мережі.

2. Вперше розроблено метод проектування апаратних компонентів нейромережових систем, таких як пряма та інверсна модель об'єкта керування, на програмованих логічних інтегральних схемах, який відрізняється використанням розроблених методів та засобів, що дозволяє підвищити рівень автоматизації проектування нейромережових моделей при їх апаратній реалізації.

3. Вперше розроблено метод проектування апаратного компоненту оптимізації вагових коефіцієнтів нейронних мереж за допомогою генетичного алгоритму при реалізації його на програмованих логічних інтегральних схемах, який відрізняється від існуючих реалізацією операцій мутації та кросовера, що дозволяє значно підвищити швидкість оптимізації вагових коефіцієнтів нейронних мереж.

4. Дістав подальший розвиток комплексний формалізований підхід до реалізації багатоетапної процедури ідентифікації складних динамічних об'єктів з використанням нейронних мереж, що відрізняється від існуючих етапом створення сукупності нейромережових моделей та їх оцінювання, що дозволяє обрати мінімальну структуру нейромережової моделі для подальшої реалізації.

5. На основі запропонованого методу проектування нелінійних функцій активації розроблено алгоритми апаратної реалізації штучних нейронів мереж прямого поширення та RBF-мереж на програмованих логічних інтегральних схем, що дозволяють підвищити швидкодію таких апаратних блоків, зменшити кількість обчислювального ресурсу необхідного для їх реалізації.

6. Розроблено узагальнену структурну схему нейроконтролера на основі програмованих логічних інтегральних схем, що реалізує базові компоненти нейромережових систем керування;

7. Реалізовано макет нейроконтролера для системи стабілізації рухомого об'єкта на обмеженій площині та проведено його дослідження, які підтвердили високу ефективність роботи контролера на базі ШНМ з алгоритмом навчання порівняно з ПІД-регуляторами;

8. На основі аналізу принципів побудови та можливостей ШНМ та нейромережових систем керування встановлено, що ШНМ є перспективним засобом реалізації компонен-

тів інтелектуальних вбудованих систем керування, що функціонують в умовах невизначеності.

9. На основі аналізу, виходячи з того, що засоби реалізації нейромережових систем керування повинні орієнтуватися на широке застосування в промислових умовах, бути універсальними і гнучкими, навчатися і адаптуватися в темпі з реальним часом, бути простими і дешевими, встановлено, що найбільш перспективними засобами можна вважати FPGA.

10. На основі аналізу існуючих на сьогодні методів та алгоритмів навчання ШНМ встановлено, що використання генетичного алгоритму для навчання нейромережових компонентів СК є найбільш оптимальним при апаратній реалізації на FPGA.

11. Результати впроваджені при розробці системи управління IT-інфраструктурою ТОВ «СІТУС ПРО». За допомогою технології та програмного забезпечення «МІМО-plant» обрано оптимальну структуру ШНМ, в підсистемі інтелектуального управління консолідованими інформаційно-обчислювальними ресурсами, що дозволило підвищити ефективність консолідованих інформаційно-обчислювальних систем на 8% при забезпеченні стабільного рівня якості надання користувачам інформаційно-телекомунікаційних послуг.

12. Розроблена технологія та програмне забезпечення «МІМО-plant» впроваджена в автоматизовану систему проектування IT-інфраструктури ТОВ «АЙАДМІН», це дозволило змодельовати і прогнозувати навантаження в корпоративній IT-інфраструктурі, що проектується. Підвищити рівень автоматизації та інтелектуалізації спеціального програмного забезпечення для автоматизованого проектування корпоративної IT-інфраструктури ТОВ «АЙАДМІН» та скоротити часові затрати на проектування на 20%. Моделювання і прогнозування навантаження в корпоративній IT-інфраструктурі здійснюється за рахунок автоматичного підбору структури штучної нейронної мережі та її навчання, по бажаним параметрам корпоративної IT-інфраструктури, що проектується.

13. Результати впроваджені у навчальний процес кафедри автоматики та керування в технічних системах КПІ ім. Ігоря Сікорського, починаючи з 2013-2014 навчального року вони використовуються в матеріалах лекцій з навчальних дисциплін «Теорія штучного інтелекту в управлінні», в якій введено новий розділ «Технології реалізації нейромережових систем керування», та «Проектування комп'ютеризованих систем керування», а також при проведенні курсового та дипломного проектування.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Volodymyr Symkovych, Peter Kravets. Hardware Implementation Neural Network Controller on FPGA for Stability Ball on the Platform // Hu Z., Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) Advances in Computer Science for Engineering and Education II. ICCSEEA 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2020. Vol. 938. Springer, Cham, Switzerland. pp. 247-256. (Іноземне видання – реферується наукометричною базою Scopus, 3-го квартіля (Q3)) – *Автором виконана реалізація нейромережової системи керування на ПЛІС, проведено дослідження на діючому макеті.*

2. Volodymyr Symkovych, Artem Volokyta, Ivan Volokyta, Vladyslav Vasyliiev. Research and Development of a Stereo Encoder of a FM-Transmitter Based on FPGA // Hu Z.,

Petoukhov S., Dychka I., He M. (eds) *Advances in Computer Science for Engineering and Education. ICCSEE 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing. Vol. 754.* Springer, Cham, Switzerland. pp. 92-101 (Іноземне видання – реферується наукометричною базою Scopus, 3-го квартіля (Q3)) – *Автором запропонований спосіб апаратної реалізації на ПЛІС синусоїдального сигналу та стерео-кодера.*

3. Volodymyr Shymkovych, Volodymyr Samoty, Sergii Telenyk, Petro Kravets, Taras Posvistak. A real time control system for balancing a ball on a platform with FPGA parallel implementation // *Technical Transactions. Poland. 2018. Vol. 5. 109-117.* (Періодичне наукове видання інших держав, які входять до ОЕСР та Європейського Союзу, реферується наукометричною базою Index Copernicus International) – *Автором запропонований спосіб апаратної реалізації на ПЛІС ПІД-регуляторів, проведена реалізація та дослідження на діючому макеті.*

4. Vladimir N. Shimkovich, Petr I. Kravets, Tatyana I. Lukina, Valeriy A. Zhrebko. Methods of Hardware and Software Realization of Adaptive Neural Network PID Controller on FPGA-Chip // *Journal of Automation and Information Sciences. 2011. Issue 4, Volume 43.* Begell House, New York, USA. pp. 70-77. (Іноземне видання – реферується наукометричною базою Scopus, 4-го квартіля (Q4), журнал включено до бази даних американського Інституту наукової інформатики Томсона (ISI)). – *Автором запропоновано метод апаратно-програмної реалізації адаптивного ПІД-регулятора на одному нейроні.*

5. Шимкович В. М., Дорошенко А. Ю., Федоренко В. О. Програмні засоби моделювання системи керування векторною тягою реактивного двигуна // *Проблеми програмування. 2018. № 2-3. С. 296-304.* – *Автором запропонований спосіб апаратної реалізації на ПЛІС ПІД-регуляторів.*

6. Шимкович В. Н., Кравец П. И., Ференс Д. А. Метод и алгоритмы реализации на ПЛИС функции активации для искусственных нейронных сетей // *Международный научно-технический журнал «Электронное моделирование». 2015. Том 37, №4. С. 63-73.* (Реферується наукометричними базами Index Copernicus International, Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems). – *Автором запропоновано метод та алгоритм апаратно-програмної реалізації сигмоїдальних функцій активації штучних нейронних мереж.*

7. Шимкович В. М., Кравец П. И., Федорчук В. В., Гой А. А. Нейромережевий контролер системи стабілізації рухомого об'єкта з апаратно-програмною реалізацією на ПЛІС // *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, керування та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. 2014. №63. С. 4-11.* (Реферується наукометричною базою даних DOAJ). – *Автором проведено експериментальне дослідження запропонованих методів та алгоритмів реалізації нейромережевих компонентів на ПЛІС.*

8. Шимкович В. Н., Кравец П. И. Метод оптимизации весовых коэффициентов нейронных сетей с помощью генетического алгоритма при реализации на программируемых логических интегральных схемах // *Международный научно-технический журнал «Электронное моделирование». 2013. Том 35, №3. С. 65-75.* (Реферується наукометричними базами Index Copernicus International, Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems). – *Автором запропоновано метод оптимізації вагових коефіцієнтів нейронної мережі за допомогою генетичного алгоритму при реалізації на ПЛІС.*

9. Шимкович В. М., Кравець П. І., Омельченко П. В. Нейромережеві компоненти систем керування динамічними об'єктами з їх апаратно-програмною реалізацією на FPGA // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, керування та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. 2013. № 59. С. 78-85. (Реферується наукометричною базою даних DOAJ). - *Автором запропоновано метод синтезу нейромережевих компонентів та проведено їх експериментальне дослідження.*

10. Шимкович В. М., Кравець П. І., Лукіна Т. Й., Ткач І. І. Розробка та дослідження технології оцінювання показників нейромережевих моделей МІМО-об'єктів керування // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, керування та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. 2012. №57. С. 144–149. (Реферується наукометричною базою даних DOAJ). – *Автором запропоновано модифікований комплексний підхід до реалізації багатоступінчастої процедури ідентифікації об'єктів керування за допомогою нейронних мереж.*

11. Шимкович В. М., Кравець П. І., Зубенко Г. А. Технологія апаратно-програмної реалізації штучного нейрона та штучних нейронних мереж засобами FPGA // Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, керування та обчислювальна техніка: Зб. наук. пр. 2012. №55. С. 174-180. (наукометричною базою даних DOAJ). – *Автором запропоновано метод апаратно-програмної реалізації штучного нейрона на ПЛІС.*

12. Шимкович В. Н., Кравец П. И., Лукина Т. Й., Жеребко В. А. Методика апаратно-програмной реализации адаптивного нейросетевого ПИД-регулятора на FPGA-кристалле // Международный научно-технический журнал «Проблемы управления и информатики». 2011. № 2. С. 130-136. (реферується наукометричними базами «Математичне ревью» («Math. Review», США, Американське математичне товариство), «Прикладна механіка» («Applied mechanics Reviews», США, Американське товариство інженерів-механіків)). – *Автором запропоновано методику апаратно-програмної реалізації адаптивного ПІД-регулятора на одному нейроні та проведено його дослідження.*

13. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А., Шимкович В. М., Дьомін Р. Ю., Мостович А.В. Нейромережеві технології оперативного діагностування технічного стану рухомого складу // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. 2011. №123. С. 119–123. – *Автором запропоновано структуру нейромережевого пристрою діагностики.*

14. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А. Методика апаратно-програмної реалізації одонеуронного нейромережевого ПІД-регулятора на FPGA // Журнал «Вісник ВПІ». 2011. №3. С. 148-152. – *Автором запропоновано методику апаратно-програмної реалізації ПІД-регулятора на одному нейроні та проведено його дослідження.*

15. Шимкович В. М., Кравець П. І., Николин О. І. Нейромережева система машинного бачення з апаратно-програмною реалізацією на ПЛІС // Науковий журнал «Молодий вчений». 2015. № 5(20). С. 47-50. – *Автором проведено експериментальне дослідження запропонованих методу реалізації нейромережевих компонентів на ПЛІС.*

16. Volodymyr Shymkovych, Veronika Niechkina. The criterion for determining the buffering time of the measuring channel for smoothing the variable changes of the sensor signal // 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine. 2020. pp. 343-346. (Реферується в наукометричною базою Scopus) – *Автором виконано моделювання автоматичної системи керування.*

17. Volodymyr Symkovych, Anatoliy Doroshenko, Vladyslav Fedorenko. Software means of modeling of the vector type of reactive engine control system // CEUR Workshop Proceedings. 2018. №2139. pp. 296-305. (Іноземне видання – реферується в наукометричних базах WoS та Scopus) – *Автором запропонований спосіб апаратної реалізації на ПЛІС ПІД-регуляторів.*

18. Volodymyr Symkovych, Peter Kravets, Volodymyr Samotyy. Method and technology of synthesis of neural network models of object control with their hardware implementation on FPGA // Proceedings of 2017 9th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications. Bucharest, Romania. 2017. pp. 947-951. (Реферується наукометричною базою WoS та Scopus) – *Автором запропонований метод проєктування нейромережесих моделей об'єктів керування на ПЛІС.*

19. Volodymyr Symkovych, Sergii Telenyk, Petro Kravets, Taras Posvistak. FPGA Implementation of the PID Algorithm for Real Time Ball Balancing on the Platform // Proceedings of The Fourth International Conference on “Automatic Control and Information Technology” (December 14-16, 2017). Krakow, Poland, 2017. pp. 160-169. (Іноземне видання) – *Автором запропонований спосіб апаратної реалізації на ПЛІС ПІД-регуляторів, проведена реалізація та дослідження на діючому макеті.*

20. Volodymyr Symkovych, Petro Kravets, Zahar Yurchenko. Algorithm for the Implementation of Radial-Basic Neural Networks and their Activation Functions on the FPGA // Proceedings of The Fourth International Conference on “Automatic Control and Information Technology” (December 14-16, 2017). Krakow, Poland, 2017. pp. 122-129. (Іноземне видання) – *Автором запропонований спосіб апаратної реалізації на ПЛІС функції Гаусса для РБФ-нейромереж;*

21. Volodymyr Shymkovych, Petro Kravets. Neural Network Control System with Direct and Inverse Model of Control Object Hardware and Software Realization of in FPGA // Information Technology, Computational and Experimental Physics. Kulczycki P., Kowalski P.A., Lukasik S. (eds.) AGN-UST. Krakow, Poland. 2016. pp. 180-183. (Іноземне видання) – *Автором запропоновано метод синтезу нейромережесих компонентів та проведено їх експериментальне дослідження.*

22. Шимкович В.М., Кравець П.І., Николин О.І. Неромережева система комп'ютерного бачення // Наука України: проблеми сьогодення та перспективи розвитку: матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Одеса, 29-30 травня 2015р.). Одеса, 2015. С. 225-227. – *Автором проведено експериментальне дослідження запропонованих методів та алгоритмів реалізації нейромережесих компонентів на ПЛІС.*

23. Шимкович В. М., Кравець П. І., Омельченко П. В. Програмне середовище і технологія моделювання нейромережесих систем керування динамічними об'єктами // Infocom Advanced Solutions 2015: матеріали І-ї міжнародної конференції присвяченої 70-річчю кафедри автоматики та керування в технічних системах (м. Київ, 24-25 листопада 2015 р.). Київ, 2015. С. 80-81. – *Автором запропонована технологія моделювання нейромережесих систем керування.*

24. Шимкович В. М., Кравець П. І. Моделі та методи синтезу апаратно-програмних компонентів нейромережесих систем керування // 21-ї Міжнародна конференція з автоматичного керування «АВТОМАТИКА – 2014» НТУУ «КПІ»: матеріали наук.-практ.

конф. з міжнар. участю (м. Київ, 23 вересня 2014р.). Київ, 2014р. С. 170-171. – *Автором запропоновано методи синтезу апаратно-програмних компонентів, таких як пряма та інверсна модель об'єкта керування, нейромережових систем керування.*

25. Шимкович В. М., Кравець П. І., Зубенко Г. А. Моделі штучних нейронних мереж при їх апаратно-програмній реалізації на FPGA // XIV міжнародная научная конференция им. Т.А.Таран «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2014»: сборник трудов (г. Киев, 14-16 мая 2014г.) г. Киев, 2014. С. 4-11. – *Автором запропоновані математичні моделі штучних нейронних мереж при їх реалізації на ПЛІС.*

26. Шимкович В. Н., Кравець П. И., Лукина Т. И., Жеребко В. А. Двухэтапная оптимизация в многообъектных иерархических системах управления на базе генетических алгоритмов // XIII международной научной конференции имени Т. А. Таран «Интеллектуальный анализ информации ИАИ-2013»: сборник трудов (г. Киев, 15-17 мая 2013 г.). г. Киев, 2013. С. 248-254. – *Автором запропонований алгоритм оптимізації в багатооб'єктних ієрархічних системах керування на базі генетичного алгоритму.*

27. Шимкович В. М., Кравець П. І., Ткач І. І. Розробка технології оцінювання показників нейромережових моделей об'єктів керування // Обчислювальний інтелект: матеріали наук.-практ. конф. з міжнар. участю (м. Черкаси, 14-18 травня 2013р.). м. Черкаси, 2013р. С. 201-202. – *Автором запропоновано модифікований комплексний підхід до реалізації багатоступінчастої процедури ідентифікації об'єктів керування за допомогою нейронних мереж.*

28. Шимкович В. М., Кравець П. І., Лукіна Т. Й., Жеребко В. А. Програмні засоби реалізації оптимізаційних алгоритмів керування складними технічними системами та комплексами // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 15-ї міжнародної наук.-техн. конф. (м. Київ, 27-31 травень 2013р.) м. Київ, 2013р. С. 291-292. – *Автором запропонований алгоритм оптимізації в багатооб'єктних ієрархічних системах керування на базі генетичного алгоритму.*

29. Шимкович В. М., Кравець П. І., Лукіна Т. Й., Жеребко В. А. Концепція єдиного підходу до вирішення оптимізаційних задач в ієрархічних технічних системах керування // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали 14-ї міжнародної наук.-техн. конф. (м. Київ, 24 квітня 2012 р.). м. Київ, 2012р. С. 80-81. – *Автором запропонований алгоритм оптимізації в ієрархічних системах керування на базі генетичного алгоритму.*

30. Шимкович В. М., Кравець П. І. Синтез нейромережових регуляторів систем керування складними динамічними об'єктами // Контроль і управління в складних системах: матеріали XI-ї міжнародної наук.-практ. конф. (м. Вінниця, 19-21 жовтня 2012р.). м. Вінниця, 2012р. С. 251-252. – *Автором запропоновано метод синтезу нейромережових компонентів та проведено їх експериментальне дослідження.*

31. Шимкович В. М., Кравець П. І., Романенко В. О., Ткач А. Б. Нейромережева система керування складним динамічним об'єктом на основі оберненої моделі // Автоматика / Automatics – 2011: матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного (м. Львів, 28-30 вересня 2011р.). м. Львів, 2011. С. 312-313. – *Автором проведено експериментальне дослідження запропонованих методів та алгоритмів реалізації нейромережових компонентів на ПЛІС.*

32. Шимкович В. М., Кравець П. І., Лукіна Т. Й., Жеребко В. А. Енергозберігаючі алгоритми оптимального керування багатооб'єктними розподіленими технічними комплек-

сами // Системний аналіз та інформаційні технології: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 23 травня 2011р.). м. Київ, 2011р. С. 270-271. – *Автором запропонований алгоритм оптимізації по енергозбереженню в ієрархічних системах керування на базі генетичного алгоритму.*

33. Шимкович В. М., Кравець П. І. Вирішення задачі оптимального та енергозберігаючого керування в багатооб'єктних розподілених технічних комплексах за допомогою інтелектуальних технологій // Обчислювальний інтелект: матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Черкаси, 10 травня 2011р.) м. Черкаси, 2011р. С. 190-191. – *Автором запропонований алгоритм оптимізації по енергозбереженню в ієрархічних системах керування на базі генетичного алгоритму.*

34. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А., Дьомін Р.Ю., Мостович А. В. Нейромережеві технології оперативного діагностування технічного стану рухомого складу // Вагони нового покоління: із XX в XXI сторіччя: матеріали 73 міжнародної наук.-практ. конф. (м. Харків, 12 квітня 2011р.). м. Харків, 2011р. С. 105-106. – *Автором запропоновано структуру нейромережевого пристрою діагностики.*

35. Шимкович В. М., Кравець П. І., Юрчук Л. Ю., Жеребко В. А. Інтелектуальна медична система для формування інформаційного портрету протікання хвороби // Біомедична інженерія і технологія: матеріали II-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 17-18 березня 2011р.). м. Київ, 2011р. С. 250-251. – *Автором реалізовано спеціалізований програмний пакет на базі нечіткої логіки*

36. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А. Інтелектуальні засоби діагностики і прогнозування стану організму // Біомедична інженерія і технологія: матеріали II-ї міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 17-18 березня 2011р.). м. Київ, 2011р. С. 98-99. – *Автором реалізовано спеціалізований програмний пакет на базі нечіткої логіки*

37. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А. Методика апаратно-програмної реалізації однеї нейронної нейромережевого ПД-регулятора на FPGA // Контроль і управління в складних системах: матеріали X-ї міжнародної наук.-практ. конф. (м. Вінниця, 19-21 жовтня 2010 р.). м. Вінниця, 2010 р. С. 321-322. – *Автором запропоновано методику апаратно-програмної реалізації ПД-регулятора на одному нейроні та проведено його дослідження.*

38. Шимкович В. М., Кравець П. І., Жеребко В. А. Програмні засоби реалізації оптимального керування в складних технічних комплексах // Розподілені комп'ютерні системи. Проектування, обчислення, застосування: матеріали ювілейної міжнародної наук.-практ. конф. (м. Київ, 6-8 квітня 2010 р.). м. Київ, 2010 р. С. 107-108. – *Автором запропонований алгоритм оптимізації в багатооб'єктних ієрархічних системах керування на базі генетичного алгоритму.*

## АНОТАЦІЯ

**Шимкович В.М.** Методи та засоби проектування апаратних компонентів нейромережових систем керування. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, 2021.



В дисертаційній роботі отримано нове вирішення науково-технічної задачі підвищення ефективності роботи компонентів нейромережових систем керування, які дозволяють синтезувати нейромережові системи керування, що функціонують та адаптуються в режимі реального часу з врахуванням специфіки завдань керування.

Розроблено метод проектування сигмоїдальної функції активації штучного нейрону на основі FPGA та алгоритми реалізації штучних нейронів. Розроблено методи проектування апаратних компонентів нейромережових систем керування, таких як нейромережева модель об'єкта керування та компонент її адаптації, які є базовими для структурного синтезу систем керування. Реалізовано та досліджено, на основі розроблених компонентів, нейромережові системи керування та розроблено макет діючого нейроконтролера системи стабілізації рухомого об'єкта на обмеженій площині. Дослідження показали високу ефективність та швидкодію розроблених компонентів.

*Ключові слова:* нейронна мережа, системи реального часу, генетичний алгоритм, системи керування, програмована логічна інтегральна схема.

## АННОТАЦИЯ

**Шимкович В.Н. Методы и средства проектирования аппаратных компонентов нейросетевых систем управления.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 - компьютерные системы и компоненты. Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, 2021.

В диссертационной работе получено новое решение научно-технической задачи повышения эффективности работы компонентов нейросетевых систем управления, которые позволяют синтезировать нейросетевые системы управления, функционирующих и адаптируются в режиме реального времени с учетом специфики задач управления.

Разработан метод проектирования сигмоидальной функции активации искусственного нейрона на основе FPGA и алгоритмы реализации искусственных нейронов. Разработаны методы проектирования аппаратных компонентов нейросетевых систем управления, таких как нейросетевая модель объекта управления и компонент ее адаптации, которые являются базовыми для структурного синтеза систем управления. Реализовано и исследовано, на основе разработанных компонентов, нейросетевые системы управления и разработан макет действующего нейроконтроллера системы стабилизации подвижного объекта на ограниченной плоскости. Исследования показали высокую эффективность и быстродействие разработанных компонентов.

Ключевые слова: нейронная сеть, системы реального времени, генетический алгоритм, системы контроля, программируемая логическая интегральная схема.

## ABSTRACT

**V. Shymkovych. Methods and means of designing hardware components of neural network control systems.** – Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.13.05 – computer systems and components. National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, 2021.

The dissertation is devoted to solving the problem of increasing the efficiency of the components of neural network control systems, which allow to synthesize neural network control systems that function and adapt in real time taking into account the specifics of control tasks.

ANN can be used in facilities such as robotics, unmanned aerial vehicle control, vehicle control, pattern recognition, analysis and decision making in the Internet of Things, spacecraft control, military equipment and many other applications of modern technologies. In these systems, neural networks can be used to identify objects, predict the state of objects, recognize, cluster, classify, analyze large amounts of data coming at high speed from a large number of devices and sensors, and more. ANN can be used to build control and correction devices, reference, adaptive, nominal and inverse-dynamic models of objects, based on which the study of objects, analysis of the impact of perturbations acting on the object, determining the optimal control law, search or calculation of the optimal program to change the control effect when changing the values of the parameters of the object and the characteristics of the input data.

Dynamic expansion of embedded systems that require the use of hardware with ANN, to increase the efficiency of their work, determine the increased requirements for these hardware, their speed, accuracy and use of computing resources.

Thus, the scientific and technical task of increasing the efficiency of hardware implementation of neural network components of control systems for dynamic objects, providing adaptation and self-tuning of control systems in real time is relevant.

The purpose of the dissertation is to increase the efficiency of neural network control systems by creating high-speed components that allow you to implement the functions of identification, adaptation and control of dynamic objects in real time.

The results of the research are presented in four sections of the dissertation.

In dissertation analyzes the areas of application of ANN hardware, the main structures of neural network control systems for dynamic objects. Based on the analysis, it was found that neural network control systems consist of direct and inverse models of the control object and the component of their adaptation.

Based on the ANN analysis, it has been established that several dozen types of ANN have been developed and researched to date, but the main, fundamentally different types are three types of networks: RBF-networks, Hopfield dynamic networks and direct distribution networks. Due to the properties ANN, they can be used for further design on their basis of direct and inverse models of the control object.

The existing methods and algorithms of ANN learning are analyzed. Based on the analysis, it is established that the use of a genetic algorithm for training the neural network components of the CS is the most optimal for hardware implementation.

The analysis of the current state of software, hardware and hardware-software means of realization of ANN is carried out. As a result of the analysis it was established that the means of implementation of neural network control systems should be focused on widespread use in industrial conditions, be universal and flexible, function and learn in real time, be simple and cheap, so the most promising tools can be considered FPGA. The review of the main works on realization of ANN by means of FPGA is carried out.

In dissertation proposes a method for designing nonlinear activation functions of an artificial neuron on an FPGA. Based on the proposed method, algorithms for hardware implemen-

tation of an artificial neuron with sigmoidal activation function and a hidden layer neuron of the RBF network with a Gaussian activation function have been developed. A research of implemented artificial neurons and ANN was performed. It is shown that due to the developed method and algorithms significant optimization of the used resource is provided, the speed of calculations of hardware units with ANN and their accuracy in comparison with analogues increases.

In manuscript develops technology for construction, research and evaluation of neural network models of multidimensional control objects for their further implementation. A method of designing hardware components, such as direct and inverse model of control object, neural network control systems, which are basic for structural synthesis of control systems, for calculation of state vectors of object and formation of control function is developed. The method of optimization of ANN weighting factors by means of genetic algorithm at realization on FPGA is developed that allows increasing considerably speed of adaptation of direct and inverse model of control object.

In dissertation implemented and researched on the basis of the developed components: control systems without feedback; feedback control systems; adaptive control system with direct and inverse models of the control object; adaptive neural network control system with a reference model; a model of the operating neurocontroller of the stabilization system of a moving object on a limited plane is developed.

Keywords: neural network, real-time systems, genetic algorithm, control systems, field-programmable gate array.

ДЛЯ НОТАТОК

This image shows a single sheet of white paper with horizontal ruling lines. The lines are evenly spaced and run across the width of the page. There are no margins, text, or other markings on the paper.

## This image shows a full page of blank handwriting practice paper. It features approximately 28 horizontal blue lines spaced evenly down the page. There are no margins, text, or other markings present.

ДЛЯ НОТАТОК

[illegible]

Підписано до друку 17 березня 2021р.  
Формат 60х90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Папір офсетний. Друк різнографічний.  
Кількість умовних друкованих аркушів 0,9  
Тираж 100 екз. Замовлення №10010.

Суб'єкт видавничої діяльності занесено до державного реєстру №620049 13.10.2008,  
ПРІНТЦЕНТР, м.Київ, вул. Політехнічна, 16

